

9. 消費燃料の推定モデルに関する一検討

航空交通管理領域 ※中村 陽一, 蔭山 康太

1. はじめに

航空交通航空交通需要が増加するなか、多様なニーズに対応するためには ATM (Air Traffic Management)の性能向上が求められる。現状の問題点や施策実施の効果を把握することにより、はじめて効果的な改善策の立案が可能となるため、ATM 性能の適切な評価は必要不可欠である^[1]。ATM の目標は安全性をはじめ、効率や環境への配慮など多岐にわたるため、多角的な側面からの評価が必要である。ICAO (International Civil Aviation Organization)では、性能評価に際して特に重要な分野として 11 の KPA (Key Performance Areas)を定めている^[2]。我が国においても、長期ビジョンである CARATS (Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems)を策定し、新たな航空交通システムの実現に向けた数値目標を定めている。各分野に対する継続的な評価およびそのフィードバックにより評価値の特性や変動を把握し、適切に評価を実施することが求められる。

本稿では、KPA における効率や環境の指標の一つである燃料消費の推定モデルの検討例を報告する。継続した評価が不可欠である一方で、全ての航空機の燃料を直接取得することは困難である。そこで、利用可能なデータから消費燃料を推定することが求められる。これにより、効率や環境の側面より評価することが可能となる^[1]。

過去の研究において、BADA (Base of Aircraft Data)^[3]における表形式のデータに基づく燃料消費量の推定を検討している^[4]。より詳細な検討を目的として開発した航空機の運動の変化に基づく燃料消費量の推定モデルについて紹介する。また、運航の各局面での推定精度における検討結果について報告する。

2. 燃料消費量推定

2.1 利用データ

本稿では燃料消費量の推定のために、RDP

(Radar Data Processing System)に記録される時刻、位置、高度、対地速度 (GS: Ground Speed) を利用した。さらに、気象庁によるメソ数値予報モデル (MSM) を風データの算出に利用した。MSM により 3 時間ごとに更新され、5km 間隔の格子点上の風データが得られるが、任意の緯度、経度、高度、時刻におけるデータの抽出のため補間を行う。RDP には低高度は記録されていないことから、5000ft 以上の場合のみを対象とした。また、推定モデルの妥当性の検証のために、実際の航空機の機上装置に記録された各時刻における燃料消費量を利用した。表 1 に示すように 4 種類の型式を含む合計 171 便に対して推定精度の検証を行った。

表 1 データサンプル

型式	サンプル数
Boeing 737-800 (B738)	44
Boeing 767-300 (B763)	35
Boeing 777-200 (B772)	69
Boeing 777-300 (B773)	23

2.2 BADA に基づく燃料消費量

燃料消費量を BADA^[3]に基づき算出する。BADA はユーロコントロールにより開発、維持されており、気象や航空機の運動に関する基礎的な方程式、航空機の型式毎の性能データ等が提供される。BADA においては、消費燃料は下記の式により与えられる。

$$f_{nom} = \eta \times Thr \quad (1)$$

$$f_{min} = C_{f3} \left(1 - \frac{H_p}{C_{f4}} \right) \quad (2)$$

$$f_{cr} = \eta \times Thr \times C_{fcr} \quad (3)$$

ここで、 Thr は推力、 H_p は気圧高度であり、係数 C_{f3}, C_{f4} については BADA において型式毎に示される。燃料消費量は f_{nom} で示すように推力に係数 η を乗じることにより計算される。一方で、アイドリング時の燃料消費量は f_{min} として式(2)

の高度の関数として与えられる。また，巡航時の燃料消費量は f_{nom} に係数 C_{fer} を乗じることで与えられる。ここで，式(1)，(3)に示す係数 η は下記の式で表される。

$$\eta = C_{f1} \times \left(1 + \frac{V_{TAS}}{C_{f2}} \right) \quad (4)$$

V_{TAS} は真対気速度(TAS: True Air Speed)であり，係数 C_{f1} ， C_{f2} については BADA において与えられる。以上より，消費燃料の算出には TAS および推力を求めることが不可欠となる。本稿では次に示すように TAS を求めることとした。

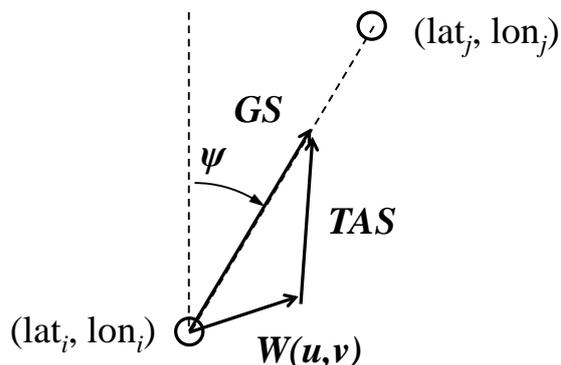


図 1 TAS の算出

2.3 真対気速度の算出

TAS の算出にあたり，本稿では RDP に記録される対地速度 (GS) から MSM により算出した風ベクトルを減じることで TAS を推定した。図 1 に概要図を示す。本稿では航空機の位置 (緯度，経度) より球面三角法を用いて航空機の真トラック角 (ψ) を算出，対地速度，風ベクトルより TAS を算出した。

TAS の算出に利用した GS は計測誤差を含み，また実際の機首方位や，ピッチ，ロール角を考慮していないために，真値と誤差が生じることが予想される。図 2 にフライトにおける観測データより推定した TAS，および機上装置に記録された TAS の一例を示す。さらに，図 3 に同フライトにおける航空機の機上装置に記録されたロール，ピッチ角の推移を示す。本稿においては水平面の運動より TAS を推定しており，高度方向の成分が入っていないために，低高度における上昇中の TAS は小さめに推定される。また，図 3 の例では特に降下時に航空機のロール角が頻繁に変化している様子が示される。このようにロール方向に運動した場合に GS の誤差が大きくなり，観測値より算出した TAS が大きく変動し，実データと異なる値となることが示される。

燃料消費量の推定のために，TAS だけでなく，TAS の変化率の利用を試みたが，推定した TAS をそのまま適用した場合非常に誤差が大きくなる。そこで， $\alpha\beta$ フィルタ^[5]を利用して平滑化を行った。図 2 に平滑化後の TAS を示しているが，本稿ではこの平滑化後の値を利用して計算を行

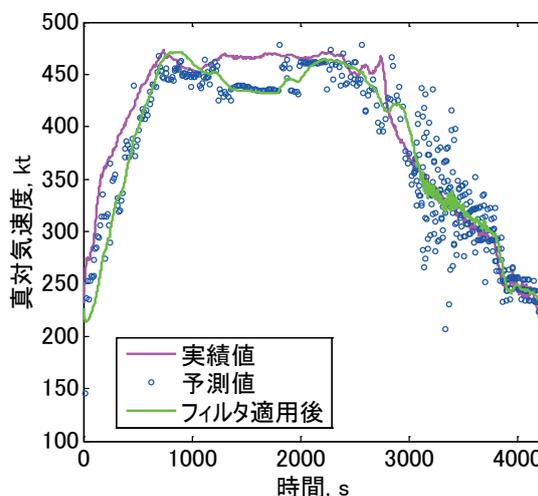


図 2 TAS の推定例

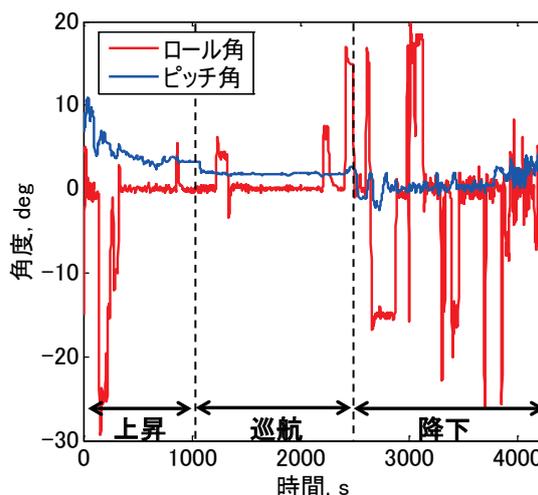


図 3 航空機の姿勢の変化

った。次に，燃料消費量の算出において重要な推力の算出について述べる。

2. 4 航空機の推力の算出

BADA においても記述される航空機の力学的エネルギーと航空機に対する仕事率の関係を表す以下の方程式である Total Energy Model を利用し、推力を算出した。

$$(Thr - D)V_{tas} = mg \frac{dh}{dt} + mV_{tas} \frac{dV_{tas}}{dt} \quad (5)$$

ここで、 Thr は推力、 D は抗力、 m は航空機質量、 g は重力加速度を示す。航空機の推力は、航空機質量、抗力、高度および TAS の変化率を利用して求めることが可能である。定常飛行を仮定すると、機体に働く抗力 D は抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L を用いて以下のように表される。

$$D = \frac{C_D \rho V_{TAS}^2 S}{2} \quad (6)$$

$$C_D = C_{D0} + C_{D2} (C_L)^2 \quad (7)$$

$$C_L = \frac{2mg}{\rho V_{TAS}^2 S} \quad (8)$$

ここで、 ρ は空気密度である。 S は主翼面積であり、係数 C_{D0} 、 C_{D2} についても BADA により与えられる。

2. 5 航空機の質量

式(5)の方程式に示されるように、航空機の質量は推力の算出において重要な要素の一つである。BADA においては航空機の型式ごとに参照質量が与えられる。一方で、実際の航空機の質量は経路や旅客により変化するため、参照質量とは異なることが予想される。そこで、BADA に記載される型式ごとの参照質量と実際の質量の比較を行った。ここでは、特に大きい誤差が見られた B763 の推定結果を図 4 に示す。実際の質量は参照質量と比較して小さく、約 3 割程度も差異があることが読み取れる。一方で質量は RDP から取得することはできないため、本稿ではサンプルデータの平均値をその型式の質量とみなして計算を行い、我が国の実情に近づけた。

3. 推定精度の検証

3. 1 検証指標

推定モデルの妥当性の検証のために、以下の式により実際の燃料消費量と推定値との誤差を算出した。

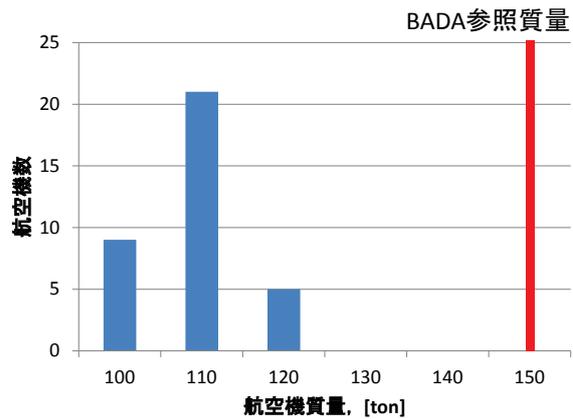


図 4 B763 の質量の分布

$$E_f = \frac{F_e - F_a}{F_a} \quad (9)$$

ここで、 F_e は推定値、 F_a は航空機の機上装置に記録された実データである。本稿では、推定精度を詳細に検討するために、図 5 に示すように 3 つの運航局面（上昇、巡航、降下）に分割し、それぞれに対して推定精度を算出した。上昇は TOC まで、巡航は TOC から TOD (Top of Descent) まで、降下は TOD 以降とする。以下それぞれの局面における推定誤差およびその要因について述べる。

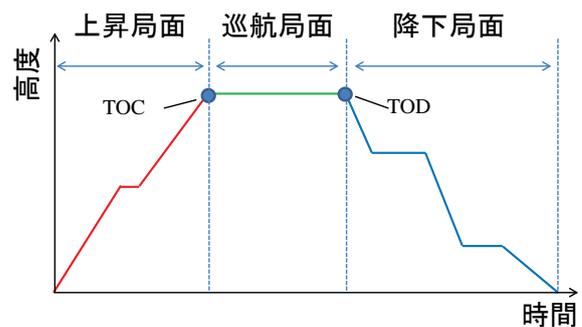


図 5 運航局面

3. 2 上昇局面

図 6 から 9 にある航空機の上昇中における高度、燃料消費量、真対気速度、ロール、ピッチ角の推移を示す。上昇時にはピッチ角およびロール角の変化が大きく、特に低高度において推定した TAS との誤差が大きい傾向が見られた。また、本推定モデルでは TAS の変化量に基づき

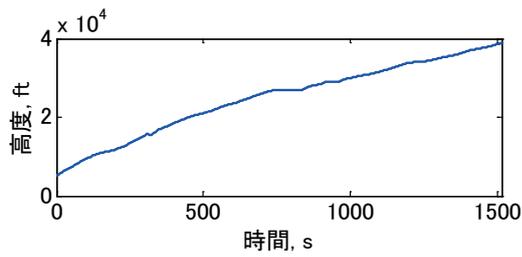


図 6 高度プロファイル例（上昇局面）

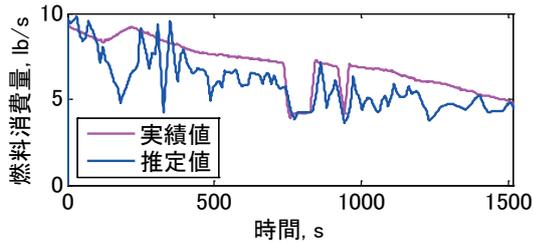


図 7 燃料消費量の推定例（上昇局面）

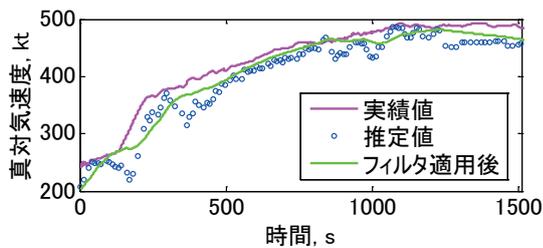


図 8 TAS の推定例（上昇局面）

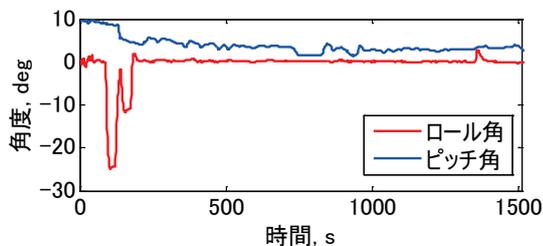


図 9 ロール、ピッチ角の推移（上昇局面）

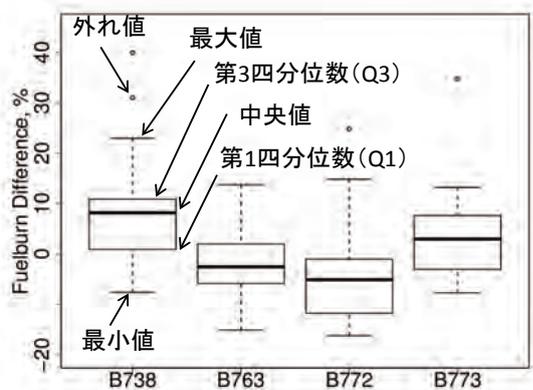


図 10 上昇局面における推定誤差

燃料の推定を行っているが、特に航空機のロール運動時には観測値に誤差が大きく、フィルタ適用後であっても推定値は振動してしまう。

図 10 には 2.1 節に示す全サンプルデータに対して推定を行った結果を箱ひげ図として示す。図において、箱の下側は第 1 四分位数 (Q1) にあたり、上側は第 3 四分位数 (Q3) である。箱中央の太い横棒は中央値を表す。箱からのびるひげの下端は $Q1 - 1.5 \times (Q3 - Q1)$ の範囲内の最小値、上端は、 $Q3 + 1.5 \times (Q3 - Q1)$ の範囲内の最大値を表す。一部のフライトでは、前述した観測誤差による振動や、TAS の推定値と真値との誤差により推定誤差が大きくなる一方で、誤差の中央値はすべての型式で 10% 以内であった。

3.3 巡航局面

図 11 から 14 に巡航局面における航空機の高度、燃料、速度の推定結果例およびそのときのロール、ピッチ角の変化を示す。一般に巡航局面において航空機は同一の高度をほぼ同一の速度で飛行することとなる。しかし、本推定モデルではロールの影響やトラック角と機首方位とのずれが考慮されていないため、巡航中において TAS の推定値が 40kt 程度異なるケースもみられた。一方で、巡航局面は 3 つの局面において最も航空機が安定して飛行する局面であり、上昇局面に示された燃料推定値の振動はあまりみられない。

図 15 にすべてのサンプルデータに対する推定誤差の計算結果を示す。推定誤差の中央値はすべての型式で 10% の範囲に収まることが示される。推定誤差が大きいケースの要因としては、前述した推定 TAS の実データとの差異が大きいことや、巡航時間が非常に短いフライトでは上昇から巡航、巡航から降下への遷移局面において、フィルタによる平滑化の影響が大きく、正しく速度の変化を表せていないことがあげられる。

3.4 降下局面

図 16 から 19 に降下時における航空機の運動の時間履歴と推定結果との差異を示す。一般に降下時は運航上の制約により、降下途中に水平

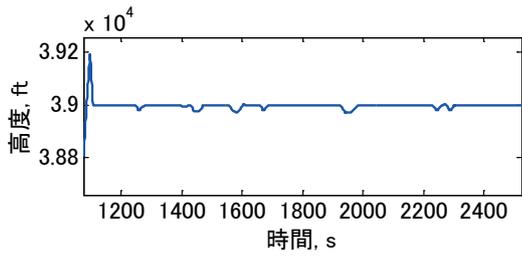


図 11 高度プロファイル例（巡航局面）

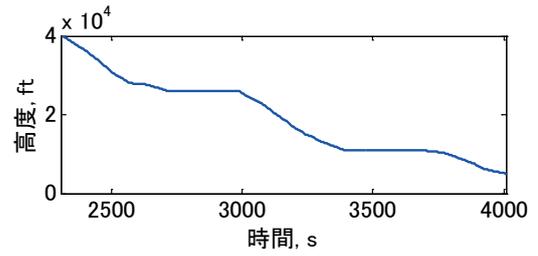


図 16 高度プロファイル例（降下局面）

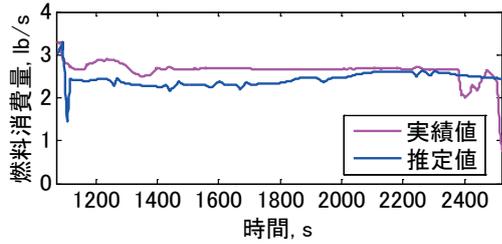


図 12 燃料消費量の推定例（巡航局面）

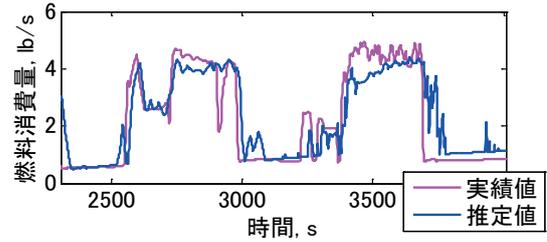


図 17 燃料消費量の推定例（降下局面）

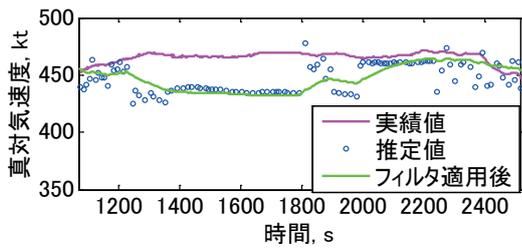


図 13 TAS の推定例（巡航局面）

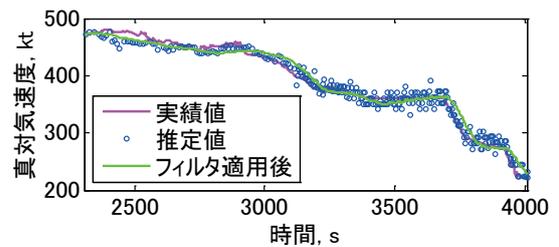


図 18 TAS の推定例（降下局面）

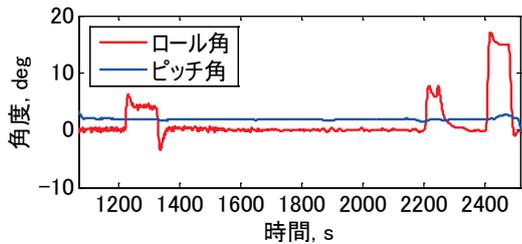


図 14 ロール、ピッチ角の推移（巡航局面）

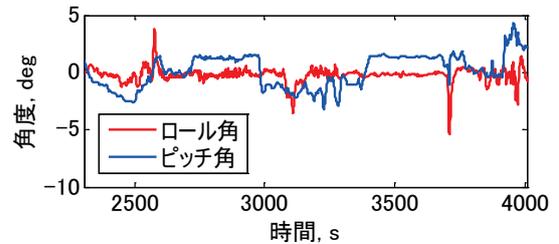


図 19 ロール、ピッチ角の推移（降下局面）

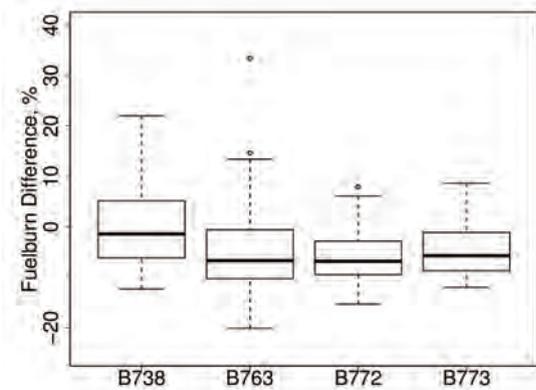


図 15 巡航局面における推定誤差

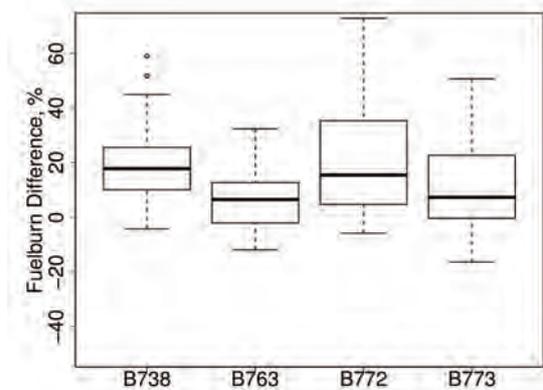


図 20 降下局面における推定誤差

飛行が頻繁にみられる。また、同時に航空機は旋回して目的空港へと向かう局面でもあるため、ピッチ角、ロール角の操作も頻繁に行われる。結果として、3つの運航局面の中で最も推定が困難であると考えられる。図17, 18に示すケースでは、速度、燃料ともに比較的正しく推定が行われている。一方で観測値のばらつきが大きく、実際にはアイドル推力で飛行中に、観測誤差の影響により加速しているとみなし、多めに燃料を推定してしまうケースや、フィルタによる平滑化の影響により、実際より少ない加速とみなしてしまうケースが多々みられた。

図20には全サンプルデータで計算した結果を示す。観測誤差の影響により、過剰に燃料消費量を推定してしまう結果となった。誤差の中央値は約2割程度に収まるものの、3つの局面では最も推定精度が悪い結果となった。

3.5 全局面を通して

全局面にわたる燃料消費量の合計値の比較結果を図21に示す。また、表2に局面ごとの推定誤差をまとめる。本推定モデルでは、Total Energy Modelに基づき、単純な速度や高度の変化より燃料消費量の推定を試みた。特に降下の局面では推定精度の悪化が見られたが、全体として約5%の範囲内で推定が可能であることが示された。

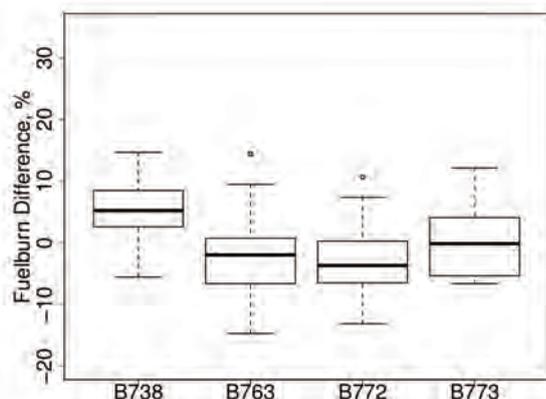


図21 全局面合計の推定誤差

表2 局面ごとの推定誤差の中央値 (%)

	B738	B763	B772	B773
上昇	8.2	-2.5	-5.1	3.0
巡航	-1.4	-6.7	-6.8	-5.7
降下	17.8	6.5	15.5	7.3
全体	5.2	-2.0	-3.7	0.1

5. おわりに

本稿では、RDPおよび数値予報モデルを利用し、簡単な速度や高度の変化より燃料消費量の推定を試みた。データの観測誤差をはじめ、ピッチやロール等 RDP では観測できない運動の影響も大きいと推定された。一方で、航空機の大まかな運動の変化はとらえることが可能であるため、全体として5%程度の誤差で燃料消費量の推定が可能であることを示した。

今後はデータの処理方法や、より実際の運動の影響を考慮した燃料消費量の推定を検討し、構築した推定モデルを利用して現行の ATM システムを効率、環境の側面より評価を行う予定である。

参考文献

- [1] Performance Review Commission, "Performance Review Report 2012", Eurocontrol, 2013.
- [2] International Civil Aviation Organization, "Manual on Global Performance of the Air navigation System", 2009.
- [3] Eurocontrol Experimental Centre, "User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.10", 2012.
- [4] Kota Kageyama, Yoshihiro Miyatsu, A Basic Study on Efficiency in Japanese Airspace, 28th Congress of the International Council of the Aeronautical Science, 2012.
- [5] 瀬之口敦, 福田豊, 航空機の動態情報を利用するコンフリクト検出手法の研究, 電子航法研究所報告, No.122, 2009.